



EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN EN MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA LA CUENCA DEL ARROYO PAN DE AZÚCAR

Juan Sanguinetti (*)

Ing. Civil, H/S, MSc. Docente (Gr3), IMFIA, director de Istec srl, APT srl. Ingeniero Civil senior en ejercicio libre de la profesión.

IMFIA-Facultad de Ingeniería-UdelaR

Santiago Narbondo

IMFIA-Facultad de Ingeniería-UdelaR

Christian Chreties

IMFIA-Facultad de Ingeniería-UdelaR

TEMA: Gestión de recursos hídricos



Dirección del autor principal (*): Montevideo, Uruguay, Tel. 094 641000: – e-mail: juanh@fing.edu.uy

RESUMEN

La precisa determinación de los parámetros de una cuenca es fundamental para obtener resultados confiables al modelar eventos en hidrología. En particular el tiempo de concentración resulta ser de los más significativos, además de ser muy utilizado en diferentes modelos. En este trabajo se comparan los resultados de un modelo hidrológico de eventos extremos teniendo en cuenta dos formas de calcular el tiempo de concentración para el caso de la cuenca del arroyo Pan de Azúcar. Para esta comparación se calculan caudales extremos para diferentes periodos de retorno con el método del NRCS y se comparan con los obtenidos con un ajuste de extremos de la serie de máximos anuales medidos. Los resultados demuestran la sensibilidad del cálculo de este parámetro (tiempo de concentración) en la determinación de caudales extremos, para el caso de estudio.

Palabras Clave: Hidrología, Modelación hidrológica, Tiempo de Concentración.

INTRODUCCIÓN

En hidrología la precisa determinación de los parámetros de una cuenca es fundamental para la adecuada modelación de eventos de tormenta. En particular el tiempo de concentración resulta ser de los más significativos y relevantes, dado que conceptualmente hace referencia al tiempo que demora en llegar la gota de agua con el recorrido hidráulicamente más largo, lo cual implica que toda la cuenca está aportando al punto de cierre. Además, es un parámetro muy utilizado en diferentes modelos, como para el caso de la tormenta de diseño del método propuesto por el Natural Resources Conservation Service (NRCS, USDA, 2010) que es ampliamente utilizado en Uruguay. Para el cálculo del tiempo de concentración existen diferentes métodos de cuantificarlo, siendo la formulación de Ramser adaptada por Kirpich (1940) de las más utilizadas a nivel global y local. Dicha formulación tiene en cuenta la pendiente del cauce principal y la longitud del mismo. En este trabajo se evalúan los resultados para dos formas diferentes de calcular las pendientes que se utilizan para cuantificar el tiempo de concentración y dos maneras de obtener el tiempo de concentración para la cuenca del arroyo Pan de Azúcar.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es evaluar los resultados de la modelación hidrológica de eventos extremos de la cuenca del arroyo Pan de Azúcar para diferentes formas de estimar la pendiente del cauce principal y el tiempo de concentración de la cuenca.

AREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la cuenca del arroyo Pan de Azúcar con punto de cierre en el puente sobre Ruta 9 en la ciudad de Pan de Azúcar. El área de la cuenca es de 316 km² y en el punto de cierre existe una estación de medición de niveles y aforos de caudales de DINAGUA. Esta estación hidrométrica acumula datos desde 1993 a la actualidad. A su vez se presenta el perfil del cauce principal en figura 2.



Figura 1.- Cuenca del arroyo Pan de Azúcar

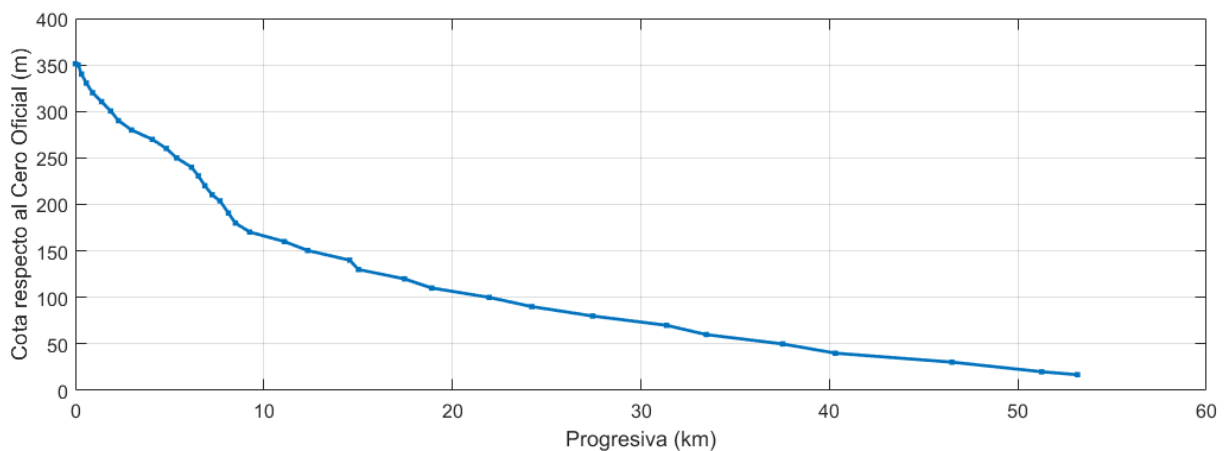


Figura 2.- Perfil del arroyo Pan de Azúcar.



25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país

METODOLOGIA

Para lograr la comparación de la incidencia de las diferentes formas de calcular la pendiente del cauce y su T_c correspondiente, en la modelación hidrológica se utilizó la siguiente metodología. Primero se realiza la caracterización hidrológica de la cuenca, dentro de la cual se calculan las pendientes del cauce por diferentes métodos; luego se determina el tiempo de concentración correspondiente a cada alternativa de cálculo de la pendiente. En base a lo anterior se implementa la modelación hidrológica y se obtienen los caudales máximos para diferentes periodos de retorno mientras paralelamente se calculan los caudales máximos mediante el ajuste de extremos de la serie de máximos anuales obtenida a partir de la serie medida. Finalmente se comparan los resultados de las diferentes fuentes. A continuación, se detalla lo realizado.

En primer lugar, se calcularon todos los parámetros necesarios para la implementación del método del Número de Curva en la cuenca, se determina la $P_{3,10}$ y el Numero de Curva promedio de la cuenca. Luego se calculó el tiempo de concentración teniendo en cuenta diferentes metodologías para calcular la pendiente del cauce principal, primero por extremos y luego por velocidad.

La pendiente por extremos se calcula como el cociente de la diferencia de cotas y el largo total del cauce (Ec. 1)

$$S_{ext} = \frac{\Delta h}{L} \quad \text{Ecuación 1}$$

Siendo S_{ext} el valor de la pendiente, Δh la variación de cotas entre el inicio y el final del cauce y L el largo total del cauce principal, ambos en metros.

Por otro lado, para el caso de la pendiente por velocidad se tiene que para el cálculo de la misma se debe discretizar el cauce en tramos. De esta forma, suponiendo el cauce mantiene su geometría (sección transversal) constante en cada tramo, se llega a Ec. 2.

$$S_{vel} = \left(L / \sum \frac{\Delta L_i}{\Delta h_i^{1/2}} \right)^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde S_{vel} es la pendiente por velocidad L es el largo total del cauce, ΔL_i el largo del tramo y Δh_i la variación de cota del tramo, todos en metros.

Para estos dos resultados de pendiente se calculó el Tiempo de Concentración y a partir de esto se calculó el hidrograma de crecida para diferentes eventos según el método del NRCS. El mismo se calculó según la fórmula de Ramser y Kirpich para el cauce principal de la cuenca del arroyo Pan de Azúcar. Dicha fórmula, como se observa en Ec. 3, tiene en cuenta el largo y la pendiente del cauce principal. Para esta última se utilizaron los dos métodos diferentes de cálculo antes mencionados y de esta manera se obtienen dos valores para el tiempo de concentración.

$$TcK = 0.4 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Siendo T_c el Tiempo de Concentración en horas, S la pendiente del cauce principal en % y L la longitud hidráulica de la cuenca en kilómetros.

Finalmente se calcula el tiempo de concentración en base al tiempo que demoraría en llegar la gota mas lejana en la cuenca, es decir el tiempo para el cual toda la cuenca esta aportando. Para esto se estimaron las velocidades por tramo de cauce con la ecuación de Manning (Ec. 4), suponiendo las características del canal. De esta forma realizando la sumatoria del producto de las velocidades por los largos de los tramos parciales se obtiene el tiempo de viaje total (Ec. 5).

$$v = \frac{1}{n} R h^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 4}$$



XI Congreso Nacional de AIDIS

Cambios, desafíos y soluciones:

El rol de la Ingeniería Ambiental en el desarrollo sostenible

25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país



$$T_{cM} = \sum \frac{\Delta L_i}{v_i} \quad \text{Ecuación 5}$$

Siendo v la velocidad del flujo, n el coeficiente de rugosidad de Manning, Rh el radio hidráulico y S_0 la pendiente de fondo. Mientras que T_{cM} representa el tiempo de concentración por velocidad de viaje calculada con Manning y L_i y v_i son las longitudes y velocidades de cada tramo.

Luego de esto se modelaron eventos extremos en la cuenca con el método del NRCS y los resultados para cada tiempo de concentración se comparan con los resultados obtenidos de realizar el ajuste a GEV (Generalized Extreme Value distribution) de la serie de caudales medidos.

Para el ajuste a GEV se calcula la serie de máximos anuales a partir de los caudales medidos en la estación hidrométrica Pan de Azúcar R9 de DINAGUA. Para esta serie se analizó la afectación de la frecuencia de medida en los máximos anuales, esto se debe a que para gran parte de la serie se tiene uno o tres datos diarios, mientras que para los últimos años se tienen datos cada media hora. De manera de cuantificar la afectación antes mencionada, se compara el valor de los caudales máximos en los años que se tiene dato cada media hora, con el caudal que se obtendría si solo se tomaran una o tres medidas diarias a las horas que tradicionalmente se media esta variable. Esto permitió cuantificar que porcentaje del pico de caudal no era captado en los años que solo se tomaban tres medidas diarias. Con esto se corrigió la serie de máximos anuales

A partir de esta serie de máximos anuales se realiza el ajuste a GEV mediante el método de los L-momentos y el cálculo de sus respectivos intervalos de confianza (IC) mediante Bootstrapping no paramétrico. Es así que se tienen los caudales medidos para diferentes periodos de retorno.

RESULTADOS

En primer lugar, se presenta el resultado de los tiempos de concentración en tabla 1. Se observa una variación importante en los valores dependiendo de que método se utilice para calcular la pendiente del cauce principal y el tiempo de concentración.

Tabla 1.- Tiempos de concentración.

TcK (pend. extremos) (hs)	TcK (pend. velocidad) (hs)	TcM (tiempo de viaje) (hs)
10	13	28

Una vez calculada esta variable se realiza la modelación hidrológica mediante el método del NRCS, los resultados de los caudales pico para los diferentes periodos de retorno se presentan en tabla 2.

Luego se realiza el análisis de afectación de caudales pico para el periodo 2018-2022, Figuras 3 y 4. De este análisis se desprende que en la serie 1993-2018 hay subestimaciones de hasta un 35% del pico de caudal, es por esto que, para realizar el ajuste a extremos la serie de máximos anuales se aumenta un 20%.

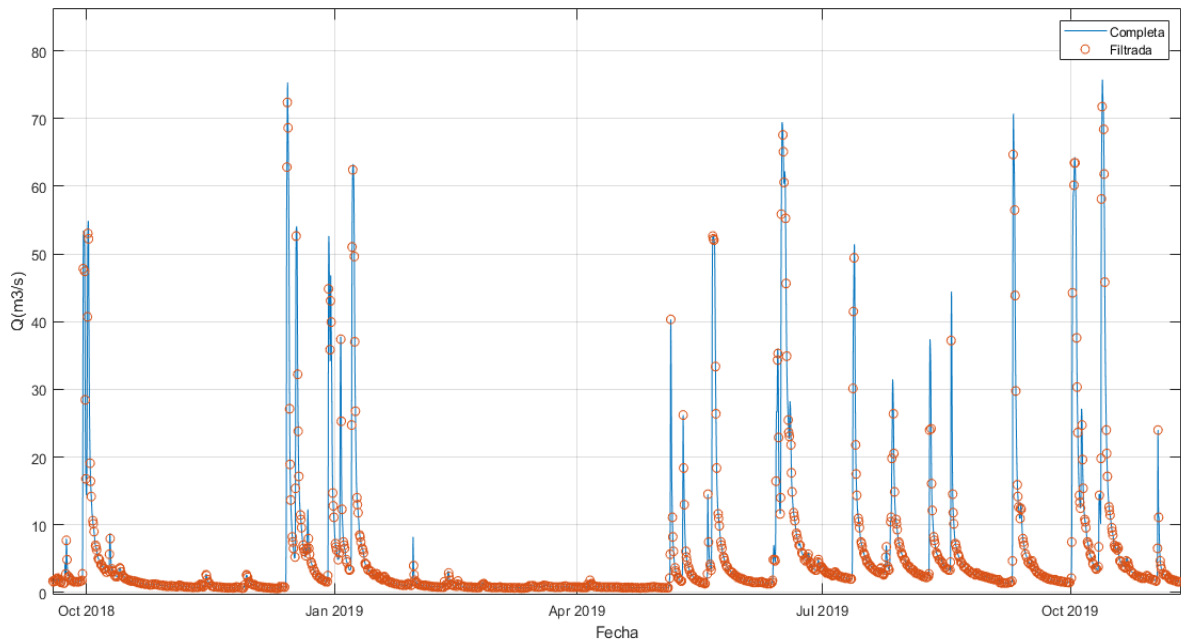


Figura 3.- Comparación de la serie completa y filtrada del arroyo Pan de Azúcar.

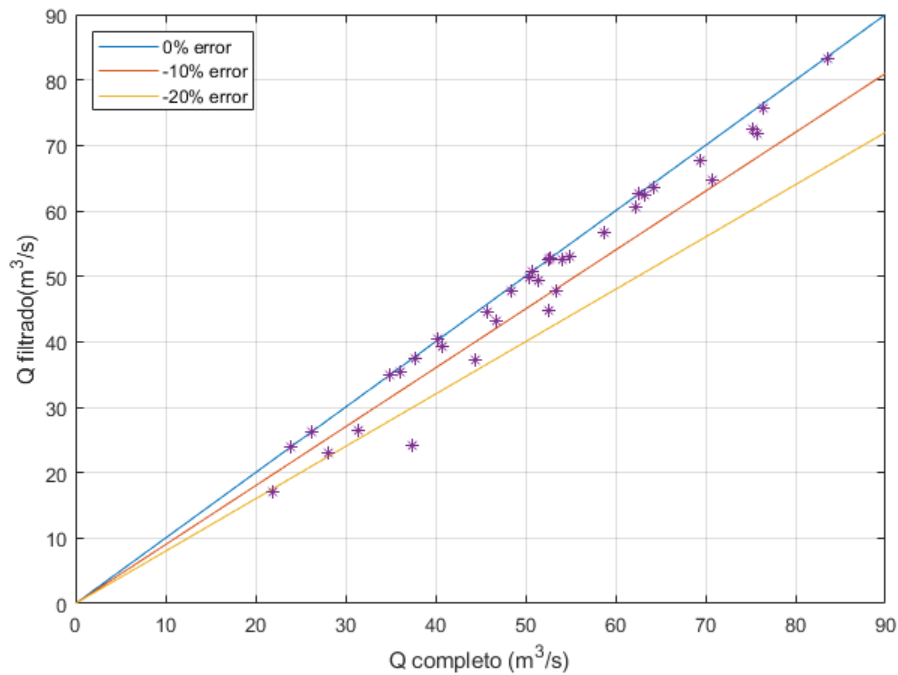


Figura 4.- Cuantificación del error para la serie filtrada.

Con esta corrección se obtiene la serie de máximos anuales y se realiza el ajuste a GEV de la serie de caudales medidos en la estación del puente de R9, el cual se observa en figura 5.

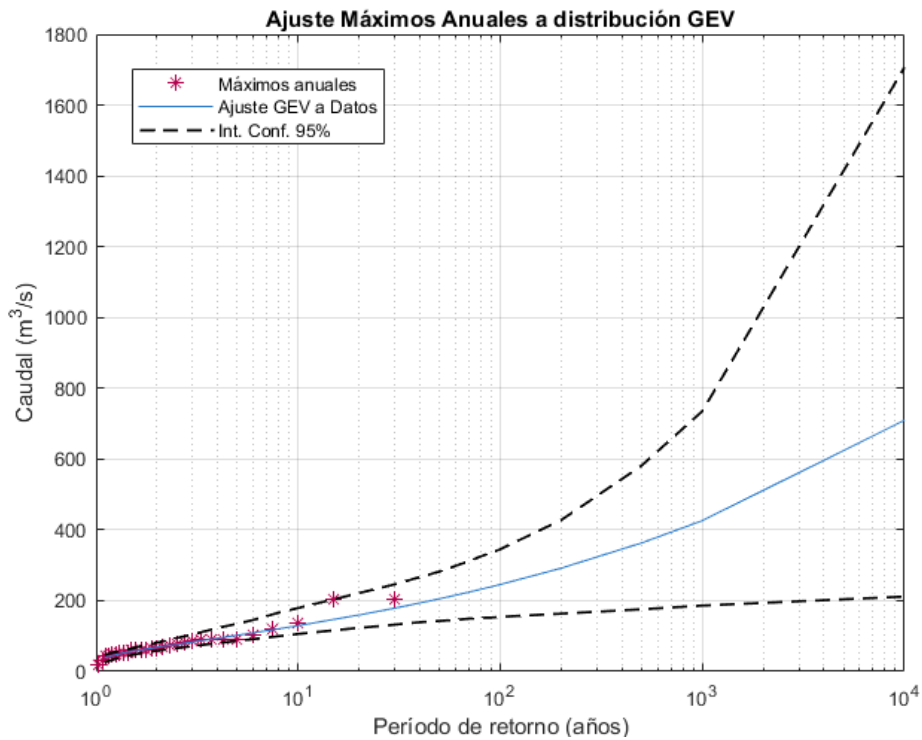


Figura 5.- Ajuste GEV a la serie de máximos anuales del arroyo Pan de Azúcar.

Una vez obtenido el ajuste se compara con los resultados que se obtienen de la modelación hidrológica, se resumen los mismos en tabla 2 y figura 6.

Tabla 2.- Resultados de caudales pico.

Tr (años)	Qmax NRCS (pend. extremos) (m3/s)	Qmax NRCS (pend. velocidad) (m3/s)	Qmax NRCS (Tiempo de viaje Manning) (m3/s)	Ajuste GEV (m3/s)	IC Inf (m3/s)	IC Sup (m3/s)
2	90.4	80.8	54.7	68.3	58.6	81.6
5	188.4	171.0	109.9	102.4	86.5	135.0
10	264.0	238.7	151.8	129.5	106.0	179.2
25	368.7	331.8	209.3	170.0	128.0	235.0
50	451.9	405.1	254.4	205.4	142.8	282.4
100	538.1	480.8	300.7	245.7	154.3	345.6
200	626.9	558.6	347.9	291.8	163.4	427.4

Se observa como los valores del ajuste a GEV son menores que los valores para la modelación siendo los más cercanos al ajuste los correspondientes al modelado con tiempo de concentración con pendiente por velocidad en el caso del cálculo con Kirpich, siendo los mejores resultados los obtenidos con el tiempo de viaje calculado con Manning.

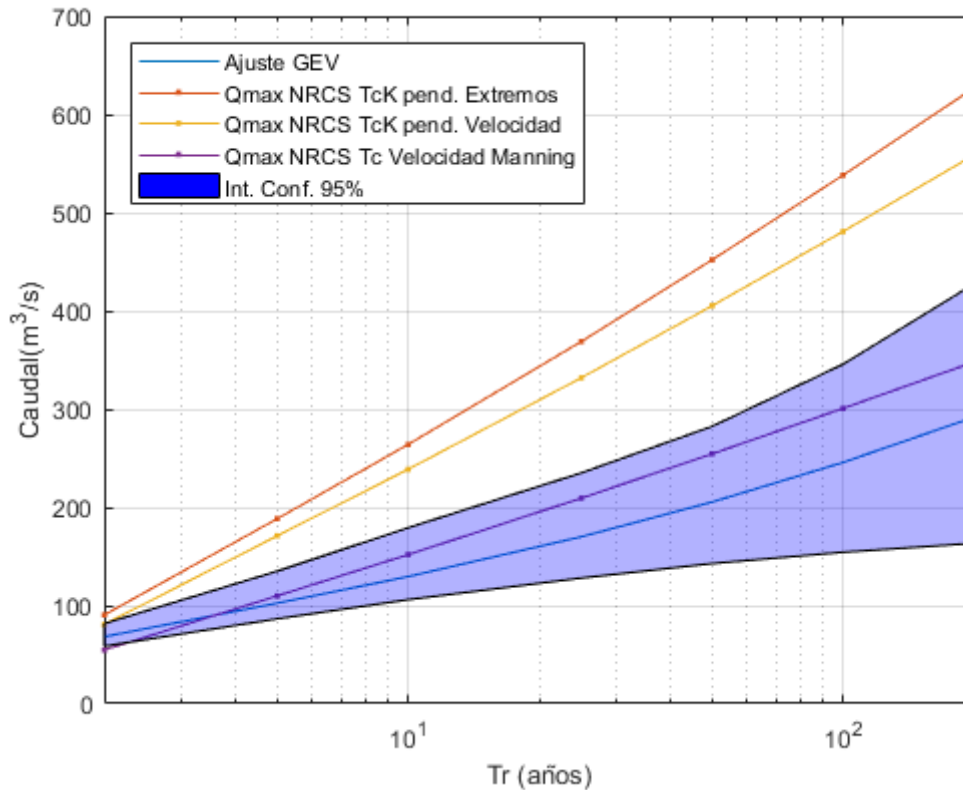


Figura 6.- Comparación de caudales pico a partir de modelación hidrológica y del ajuste GEV a la serie de máximos anuales del arroyo Pan de Azúcar.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

La estimación del Tc utilizando la formulación de Kirpich y el cálculo por tiempo de viaje (Manning) resultó en un factor aproximadamente de 1 a 3, mientras que los dos métodos aplicados para estimar la pendiente media del cauce para estimar el TC utilizando la formulación de Kirpich, produjeron resultados diferentes en un orden de 1 a 1,3.

Como era de esperar este hecho provocó un impacto significativo en los resultados de los caudales extremos obtenidos de la modelación hidrológica.

Analizando los resultados de las modelaciones hidráulicas realizadas para los diferentes Tc, se encontró que los resultados que más se acercaban a los resultados obtenidos a partir de las mediciones fueron los que se calcularon estimando el Tc por tiempo de viaje con la velocidad estimada con Manning. Se encontró también que estimar el Tc por el método de Kirpich en esta cuenca, produce resultados de caudales mayores a los medidos. Este resultado está en línea con la recomendación de la aplicabilidad de la formulación de Kirpich para cuencas pequeñas.

Resulta de interés profundizar y expandir este análisis a otras cuencas que dispongan de información hidrométrica cuya superficie abarque los diferentes rangos antes mencionados (y rangos superiores), de modo de consolidar este resultado obtenido en el Arroyo Pan de Azúcar.



XI Congreso Nacional de AIDIS

Cambios, desafíos y soluciones:

El rol de la Ingeniería Ambiental en el desarrollo sostenible

25 al 27 de octubre de 2022



Cámara Mercantil de productos del país

Por otro lado, conviene destacar que la comparación de resultados de caudal extremo entre el ajuste GEV y el modelo hidrológico, admite diferencias por otras razones más allá del Tc. Ejemplo de ello son las siguientes:

- En el caso del ajuste GEV, se realiza en base a caudales observados entre 1993 y 2022. Sin embargo, en la aplicación del modelo NRCS los valores de precipitación empleados alcanzan 1980. No obstante, el análisis comparativo de series de precipitación hasta 1980 y hasta 2005 publicado (Silveira et. al, 2014) permite observar diferencias significativamente menores a las obtenidas en la Tabla 2, entre el modelo NRCS y el ajuste GEV.
- En el ajuste GEV la estadística se aplica sobre datos de caudal, mientras que modelo NRCS la estadística se aplica sobre datos de precipitación, por lo tanto, existe incertidumbre en la transformación precipitación- caudal. De igual forma que lo anterior, las diferencias encontradas en la Tabla 2, no pueden ser asociables a esta incertidumbre.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Kirpich ZP. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. Journal of Civil Engineering. 10(6): 362.

Silveira L, Usera G, Alonso J, Scavone M, Chreties C, Perera G, González M “Nuevas curvas intensidad–duración–frecuencia de precipitación para el departamento de Montevideo, Uruguay”, Agrocienza Uruguay vol.18 no.1 Montevideo jun. 2014

USDA (2010). Part 630 Hydrology -National Engineering Handbook (NEH). Natural Resources Conservation Service , U. S. Department of Agriculture, Washington, D.C.